

На правах рукописи

Пашко Анна Геннадьевна

КОНФИГУРАЦИИ ДИНАМИЧЕСКИХ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР  
И ПРОЦЕССЫ ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЯ ПЛЕНОК ФЕРРИТОВ-  
ГРАНАТОВ

Специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук



Екатеринбург  
2009

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького» на кафедре магнетизма и магнитных наноматериалов.

Научный руководитель:

доктор физико-математических. наук,  
профессор, Заслуженный деятель науки РФ  
Г.С. Кандаурова

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических. наук,  
профессор А.П.Потапов

доктор физико-математических. наук,  
профессор В.Я.Шур

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Уральский государственный технический университет – УПИ им. первого президента России Б.Н. Ельцина»

**Защита состоится:** 10 декабря 2009 года в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.286.01 по защите докторских и кандидатских диссертаций при ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М.Горького» по адресу 620000, г. Екатеринбург, пр. Ленина, 51, комната 248.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО «Уральский государственный университет им. А.М. Горького».

Автореферат разослан 9 декабря 2009 года

Ученый секретарь  
ученого совета Д 212.286.01  
доктор физ.-мат. наук, профессор



НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА КГУ



0000621089

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Пленки ферритов-гранатов широко используются в устройствах магнитоуправляемой оптики для обработки оптических сигналов, записи информации, визуализации и топографирования магнитных полей [1]. Принцип действия таких устройств основан на изменении намагниченности (движении доменной структуры) под действием внешних магнитных полей. В связи с этим изучение процессов динамического перемагничивания пленок ферритов-гранатов является актуальной задачей физики магнитных явлений.

Активное исследование доменной структуры (ДС) пленок ферритов-гранатов началось в 1970х годах как сред, являющихся перспективными для записи информации на цилиндрических магнитных доменах. Соответственно, основное внимание уделялось поведению цилиндрических магнитных доменов под воздействием внешних магнитных полей области частот  $10^6$ - $10^8$  Гц. В 1988 году было обнаружено [2], что при низких частотах магнитного поля ( $10^2$ - $10^4$  Гц) происходит упорядочение доменной структуры пленок ферритов-гранатов - образование устойчивых спиральных и кольцевых доменов. Такое поведение коллектива доменов наблюдалось впервые и вызвало значительный интерес. Состояние доменной структуры образца, в котором происходит формирование упорядоченных доменных структур, было названо авторами «ангерным». Особенностью ангерного состояния (АС) являлось то, что упорядоченные динамические ДС возникали, «жили» некоторое время и разрушались, потом вновь возникали, жили, исчезали и т.д. Для описания АС наряду с конфигурационными параметрами динамической ДС были введены динамические параметры ангерного состояния – «время жизни»  $T_g$  конкретной динамической структуры определенного вида и время ожидания  $T_w$  появления подобных структур на контролируемой части образца.

Несмотря на довольно обширные экспериментальные и теоретические исследования ангерного состояния [3-15] открытым остается вопрос о причинах и механизмах образования, трансформации, разрушения динамических спиральных и кольцевых концентрических доменов.

Подробно действие линейного градиента на спиральные динамические домены до сих пор не исследовано. Известна только одна работа по получению динамических спиральных доменов в неоднородном магнитном поле [3].

Ангерное состояние, характеризующееся формированием кольцевых концентрических доменов, остается не изученным. Более того, до сих пор не поднимался вопрос о возможности ангерных состояний пленок при частотах  $f < 100$  Гц.

Кольцевые и спиральные домены в ангерном состоянии устойчивы, их можно наблюдать в оптический микроскоп. Однако они окружены динамическим доменным хаосом, конкретная конфигурация доменов в котором неразличима. Доменные структуры, образующиеся в частотно-амплитудных областях, соседствующих с ангерной областью, также мало изучены.

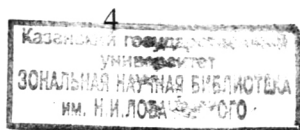
Необходимо более полное исследование динамической доменной структуры и гистерезисных свойств пленок ферритов-гранатов. Результаты такой работы могли бы предоставить новые факты поведения упорядоченных динамических доменных структур, необходимые для лучшего понимания природы явления самоорганизации в магнитных средах.

**Целью** данной работы являлось комплексное исследование динамической доменной структуры и динамических гистерезисных свойств высокоанизотропных пленок ферритов-гранатов: получение экспериментальных данных, которые позволили бы подступиться к выяснению вопроса о механизме формирования упорядоченных динамических доменных структур.

Для достижения этой цели в работе решались следующие основные задачи:

- установление однозначного соответствия вида конкретных динамических доменных структур конкретным участкам петель гистерезиса в области звуковых частот внешнего пространственно однородного гармонического поля. Исследование поведения массива доменов в течение одного периода поля;

- исследование динамической доменной структуры пленок ферритов-гранатов в гармонических и импульсных пространственно однородных магнитных полях ультранизких частот (частота  $f < 20$  Гц) на возможность реализации ангерного





состояния.

– определение влияния постоянного подмагничивающего поля с линейным градиентом на поведение спиральных динамических доменов в пленках ферритов-гранатов.

**Научная новизна** диссертационной работы состоит в следующем:

1. В результате исследования динамической доменной структуры пленок ферритов-гранатов стробоскопическим методом в широком диапазоне частот и амплитуд гармонического поля впервые обнаружены и выделены как отдельный тип древовидные динамические доменные структуры.

2. Обнаружено ангерное состояние, формирующееся в пленках ферритов-гранатов под действием магнитных полей ультранизких частот ((0,01-20) Гц). В гармонических магнитных полях данного диапазона частот формируются системы кольцевых концентрических доменов, а в полях типа симметричный меандр – плотная упаковка спиральных динамических доменов. Время жизни этих структур достигает нескольких часов.

3. Показана кинетика образования спиральных доменов - в импульсных полях ультранизких частот они формируются в результате вращения внутреннего конца спирального домена под действием гиротропной силы.

4. Выявлено, что образование систем кольцевых концентрических доменов в гармонических полях ультранизких частот обусловлено высокой амплитудой поля, задержкой намагничивания, наличием в образце нескольких точечных дефектов.

5. Исследовано поведение цепочек спиральных динамических доменов, формирующихся в присутствии подмагничивающего поля с линейным градиентом. Обнаружено, что:

- время жизни цепочечных динамических спиральных доменов возрастает с ростом градиента поля, имеет максимум, после которого резко уменьшается. Максимальное время жизни на порядок превышает время жизни спирального динамического домена в отсутствие подмагничивающего градиентного поля;

- показано, что с ростом градиента спиральные домены сжимаются вдоль нулевой линии градиента, а количество витков в них уменьшается;

- наличие градиентного подмагничивающего поля влияет на траекторию движения спирального домена. Цепочечный спиральный домен перемещается только вдоль нулевой линии градиента постоянного поля. Скорость его дрейфа на порядок меньше, чем скорость дрейфа одиночного спирального домена в пространственно однородном гармоническом поле;

- установлено, что в градиентном магнитном поле зависимость числа витков цепочечного спирального домена от величины градиента поля монотонно убывает, начиная с некоторого значения.

**Достоверность результатов** диссертационной работы основана на применении апробированных экспериментальных методик, на статистическом характере экспериментальных исследований: все эксперименты были проведены неоднократно, и можно говорить об их полной повторяемости. Полученные в работе результаты не противоречат экспериментальным результатам, полученным другими авторами и уже опубликованным в открытой печати.

**Практическая значимость результатов.** Полученные в работе результаты вносят существенный вклад в понимание механизмов перемагничивания, приводящих к трансформации петель гистерезиса и формированию динамических доменных структур разнообразных конфигураций. Результаты работы служат основой для дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в области магнитных свойств эпитаксиальных пленок с перпендикулярной анизотропией.

**Личный вклад.** Все представленные в диссертации результаты получены при личном участии автора. Автором были освоены экспериментальные установки, аттестованы образцы, использовавшиеся в ходе экспериментов. Автором или при его непосредственном участии были проведены все экспериментальные исследования и обработаны их результаты. Автор участвовал в постановке промежуточных экспериментальных задач, в обсуждении и интерпретации конечных результатов исследования. В коллективных публикациях автор лично принимал участие в написании текстов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы, опубликованы в реферируемых научных

руссииских журналах («Физика твердого тела», «Физика металлов и металловедение»).

По результатам работы представлено 9 докладов на 4-х международных конференциях: IXX международная школа-семинар «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 28 июня-2 июня 2004 г. Москва; XX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 12 июня-16 июня 2006 г., Москва; ESTMAG-2007 23-26 August 2007, Kazan, Russia; III Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» Сентябрь 23-26, 2008, Иркутск, 2008.

**Публикации.** Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4 научных статьях и 9 тезисах докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитируемой литературы. Общий объем работы составляет 113 страниц, включая 54 рисунка, 2 таблицы и список литературы из 120 наименований.

Исследования по теме диссертации выполнены при поддержке грантов Министерства Образования РФ Е00-3,4-258 «Ангерное состояние и доменные структуры магнитоодноосных пленочных кристаллов и неоднородных кристаллов с многоуровневой иерархией»; Университеты России 01.01.434 «Явления самоорганизации в неоднородных и неравновесных многодоменных средах»; РФФИ-Урал «Динамические доменные структуры в тонких магнитных слоях с перпендикулярной анизотропией»; РФФИ 08-02-99081-р\_офи «Разработка новых магнитооптических сенсорных сред для визуализации и топографирования неоднородных магнитных полей».

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируется цель работы и выполняемые в связи с этим задачи, изложена структура диссертации.

**Первая глава** посвящена обзору экспериментальных и теоретических результатов по исследованию динамических доменных структур, известных на сегодняшний день и непосредственно связанных с темой исследования.

**Вторая глава** является методической. В ней представлены

методы наблюдения доменов и получения интегральных характеристик процессов перемагничивания. Приведены описания используемых при проведении экспериментов магнитооптических установок для исследования динамических доменных структур в гармонических магнитных полях и магнитных полях типа симметричный меандр (знакопеременные прямоугольные импульсы).

Все полученные в данной работе видеоснимки динамических доменных структур были выявлены с помощью магнитооптического метода Фарадея и зафиксированы на видео пленку. Затем видеоснимки оцифровывались для получения компьютерных изображений доменной структуры. Динамические петли гистерезиса были получены также магнитооптическим методом.

Наблюдение динамической доменной структуры пленок ферритов-гранатов в гармонических магнитных полях в области частот (0,2-7) кГц осуществлялось стробоскопическим методом. Подсветка образца велась стробоскопически – при строго заданных значениях поля. Импульсы света можно было получать в любой момент времени по периоду поля. Таким образом, были «просканированы» динамические доменные структуры пяти образцов в области частот и амплитуд гармонического поля соответственно (0,2 - 7) кГц и (0-170) Э. Длительность подсветки варьировалась от 0,1 до 0,3 микросекунды.

Видеосъемка динамических доменных структур в полях ультранизких частот и цепочек спиральных динамических доменов проводилась с использованием функции видеокамеры, позволяющей получать кадры с экспозицией до  $10^{-4}$  секунды.

Для получения неоднородного переменного магнитного поля с линейным градиентом использовались одновременно катушка, создающая пространственно однородное переменное поле и электромагниты для получения постоянного поля с линейным градиентом.

В качестве объектов исследования были выбраны 5 эпитаксиальных пленок ферритов-гранатов с различными магнитными параметрами. Эксперимент показал, что поведение доменной структуры образцов подобное, поэтому для представления полученных результатов нами были выбраны две

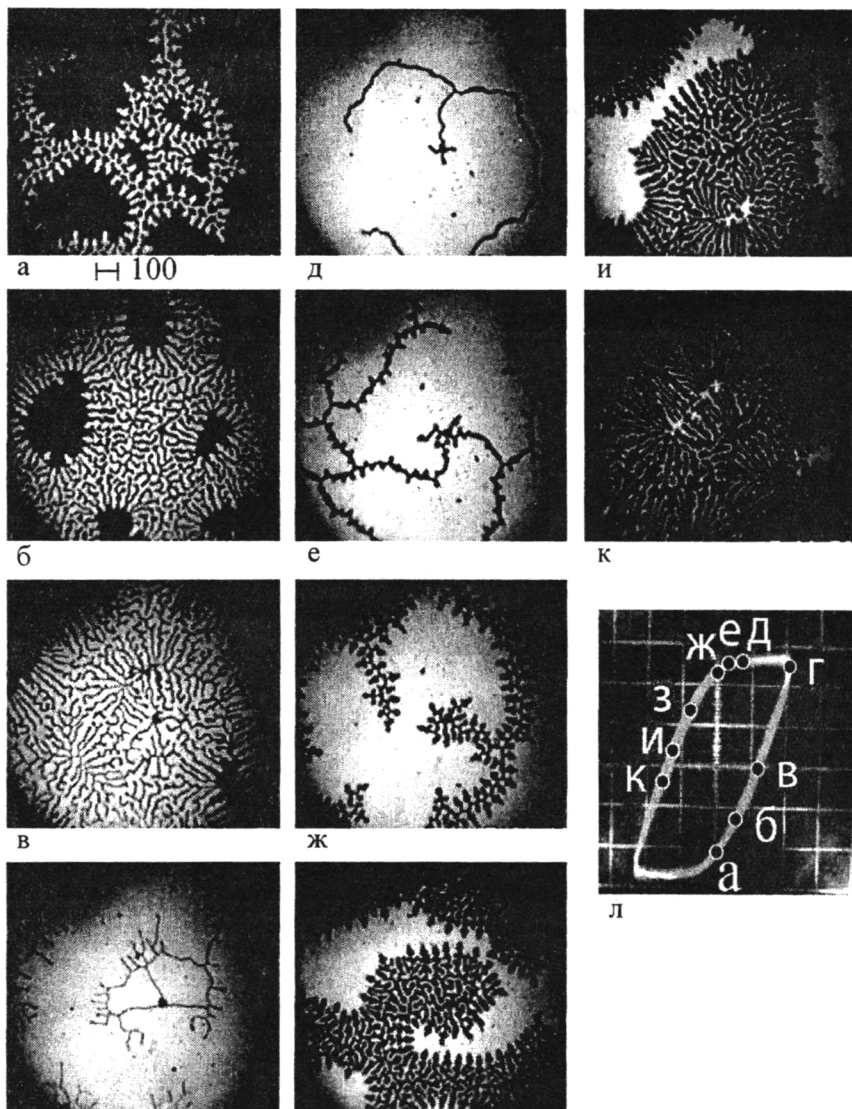


Рис. 1. Динамические доменные структуры и петля гистерезиса образца №1,  $f=3,2$  кГц,  $H_0=81$  Э. Мгновенные значения поля: а – 0, б – 25, в – 45, г – 81, д – 28, е – 14, ж – 0, з – -28, и – -45, к – -59 Э. На петлях гистерезиса черными точками и буквами обозначены моменты фиксирования соответствующих приведенных доменных структур.

пленки, наиболее отличающиеся по фактору качества: образец №1 ( $Q=73$ ) и образец №4 ( $Q=3$ ).

**Третья глава** посвящена исследованию динамических процессов перемагничивания пленок ферритов-гранатов в пространственно однородном гармоническом магнитном поле.

Сначала были измерены петли гистерезиса (ПГ) образцов. Во время их измерения фиксировались параметры поля, при которых наблюдались известные особенности гистерезисных свойств – мигающая, размытая, треугольная ПГ [4-8]. Таким образом, рабочий диапазон частот (0,2 - 7) кГц и амплитуд (170 Э) внешнего поля определялся в ходе эксперимента.

Затем при этих же параметрах поля снимались на видеопленку динамические доменные структуры. Эксперимент проводился с использованием стробоскопической методики, которая позволила получить четкие картины динамической ДС и проследить её поведение в течение периода поля.

Набор полученных данных подробнейшим образом иллюстрирует трансформацию доменной структуры в течение периода поля при различных частотах и амплитудах (например, рис. 1).

Эксперимент показал, что по виду доменных структур исследуемую область амплитуд переменного поля можно разделить на три части:

- 1) ( $H_0 \leq H_1$ ) – полосовая доменная структура, в т.ч. ангерное состояние (рис. 2а);
- 2) ( $H_1 \leq H_0 < H_2$ ) – древовидные доменные структуры (рис. 2б);
- 3) ( $H_2 \leq H_0 < H_3$ ) – радиальные (радиально-блочные) доменные структуры (рис. 2в).

Для представленного в работе образца №1 эти области следующим образом связаны с полем его статического насыщения  $H_s$ : ( $H_1 \sim H_s$ ); ( $H_2 \sim 2,5H_s$ ); ( $H_3 \sim 4H_s$ ).

Мы считаем, что такое видоизменение доменных конфигураций с ростом амплитуды поля может свидетельствовать о смене механизмов перемагничивания. Возможно, при достижении амплитудой значения  $H_1$  происходит не только последовательное перемещение доменной стенки, но и образование неоднородностей типа вихрей (блоховских линий, блоховских точек) в локальных областях доменной границы, за

счет чего ее участки движутся с различной скоростью. Об этом свидетельствуют впервые наблюдаемые полосовые домены с отростками (рис. 1е), которые всегда предваряют формирование древовидной доменной структуры.

В образце №4 с умеренным фактором качества наблюдалось только 2 первых типа динамической ДС, что может быть обусловлено более высокой скоростью движения ДГ в нем.

Исследование доменной структуры стробоскопической методикой показало, что в некотором диапазоне амплитуд гармонического поля формируются фракталоподобные древовидные динамические доменные структуры (рис. 1е, рис. 2б). Динамические ДС такого вида наблюдались впервые. Конфигурации древовидных доменов, могут быть различными в зависимости от параметров образца и переменного поля. Выявлено, что древовидные структуры образуются на нисходящей части петель гистерезиса (рис. 2б) при снижении поля от амплитудного значения, вероятно, они являются наиболее выгодными для максимально быстрого снижения неравновесности динамических ДС.

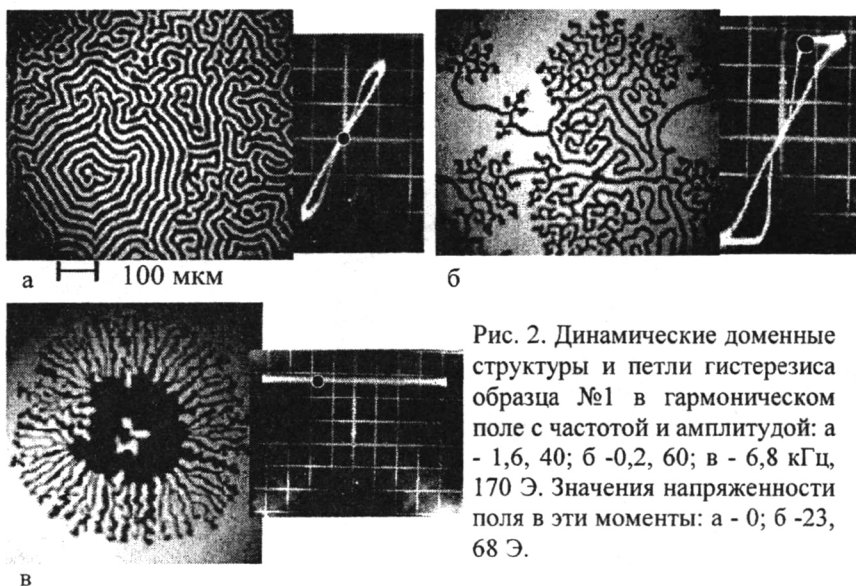


Рис. 2. Динамические доменные структуры и петли гистерезиса образца №1 в гармоническом поле с частотой и амплитудой: а - 1,6, 40; б - 0,2, 60; в - 6,8 кГц, 170 Э. Значения напряженности поля в эти моменты: а - 0; б - 23, 68 Э.

Эксперимент позволил подробно исследовать поведение спиральных динамических доменов (СДД) в течение периода поля. Можно сказать, что искажения ядра СДД, предвещающие его разрушение, обусловлены не изменением поля в течение периода, а, вероятно, процессами образования блоховских линий и точек внутри его доменной стенки.

Эксперимент показал, что формирование динамического спирального домена движением конца внешнего витка спирали маловероятно, поскольку последний всегда связан с окружающей хаотической доменной структурой (рис. 2а).

Показано, что скорость движения конца полосового домена растущей фазы зависит от скорости изменения поля и меняется в течение периода поля, достигая наибольших величин в момент нулевого значения поля. Такие результаты согласуются с литературными данными [16].

В четвертой главе представлены результаты эксперимента по наблюдению динамических доменных структур в гармоническом поле и поле типа симметричный меандр ультранизких частот (0,001-20 Гц). Поведение динамической ДС пленок ферритов-гранатов в таком диапазоне частот ранее никем не исследовалось. Эксперимент, проведенный в работе, показал, что и при таких низких частотах происходят процессы самоорганизации в доменной структуре образцов.

Вид упорядоченных динамических доменных структур

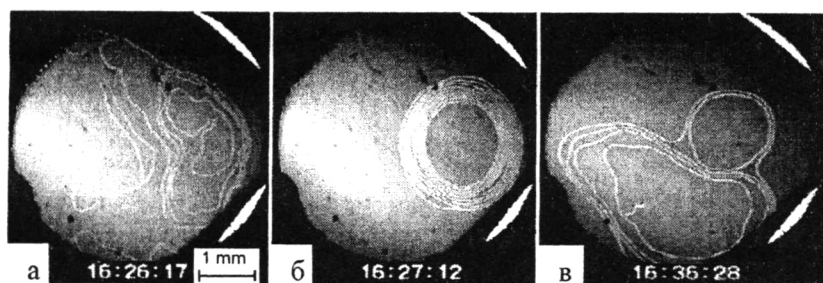


Рис. 3. Характерный вид одной и той же системы кольцевых концентрических доменов образца №1 в самом начале ее жизни, в течение жизни и при разрушении (а-в). Параметры гармонического поля:  $f=2,3$  Гц и  $H_0=80$  Э.



зависит от формы поля: в случае гармонического поля это системы кольцевых concentрических доменов (ККД), в случае поля типа симметричный меандр это спиральные динамические домены. Все структуры в данной области частот имеют очень продолжительное время жизни – вплоть до нескольких часов.

Характерные доменные структуры, показывающие эволюцию одной системы кольцевых concentрических доменов показаны на рис. 3. Эти картины типичны и для других кольцевых систем. В течение периода поля преобразуются, в основном, ядро и окружение системы ККД. Сама система колец изменяется лишь в деталях (в момент, когда поле  $H=0$  Э кольца претерпевают изгибные искажения).

Формирование наблюдаемых в эксперименте систем кольцевых concentрических доменов начинается с формирования полосового домена в виде замкнутого кольца, закрепленного на одном или нескольких дефектах. Затем к нему начинают пристраиваться полосовые домены из окружающего хаоса. Число таких concentрических петель растет, а их форма приближается к круговой. Так образуется целая устойчивая система ККД (рис. 3б). Необходимые условия для образования таких кольцевых структур – достаточно большая амплитуда поля, наличие небольшого количества дефектов. Гиротропная сила в данном случае играет незначительную роль.

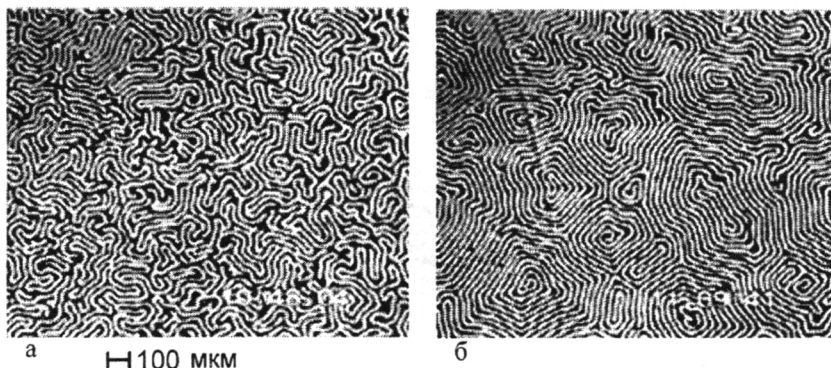


Рис. 4. Доменная структура пленки феррита-граната в переменном магнитном поле типа симметричный меандр частотой  $f=2,5$  Гц, амплитудой  $H_0=27$  Э: а) в начале действия поля; б) через 22 мин.

Упорядоченные динамические ДС в виде систем концентрических кольцевых доменов в инфразвуковой области частот более крупные (в 4 раза) и значительно более устойчивые (в 3 раза), чем системы ККД, наблюдавшиеся ранее в интервале частот 120-200 Гц [3]. Имеется ряд теоретических исследований статических и динамических кольцевых доменных структур (см. напр. [14]), однако системы динамических ККД с теми особенностями, которые описаны в данной работе, насколько нам известно, никем не рассматривались.

В импульсном магнитном поле типа симметричный меандр в диапазоне частот  $f=(0,01\div 20)$  Гц и амплитуд  $H_0\sim(0,5-0,7)H_S$  реализуется ангерное состояние, характеризующееся формированием спиральных динамических доменов (СДД).

Постепенно (рис. 4) формируется плотная упаковка спиральных динамических доменов, которые ведут себя совершенно аналогично уже известным в области частот  $10^2-10^4$  Гц СДД – возникают, "живут" некоторое время жизни, перемещаясь случайным образом по пленке, меняя при этом количество витков и их форму, затем разрушаются. Время ожидания  $T_w$  в данном случае равно нулю, поскольку на наблюдаемом участке образца спиральные домены существуют непрерывно. Таким образом, следует говорить не об отдельных СДД, а о системе спиральных динамических доменов (рис. 4б).

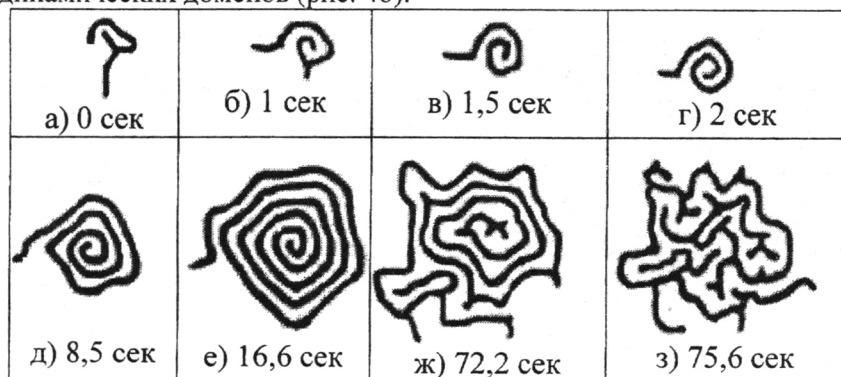


Рис. 5. Трансформации спирального домена в течение его времени жизни. В подписи указано время, прошедшее с момента а.

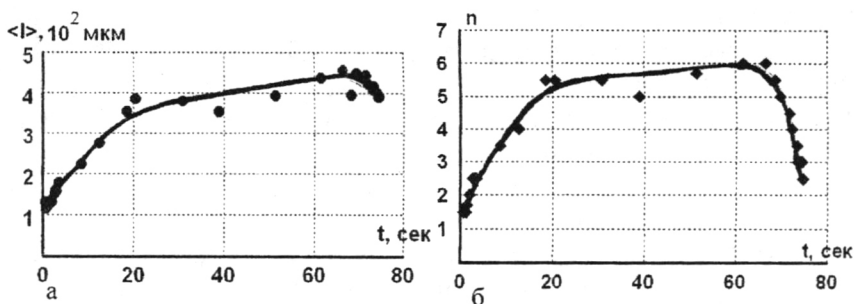


Рис. 6. Зависимость от времени: а - среднего ( $\langle l \rangle$ ) размера спирального домена; б - количества витков ( $n$ ).

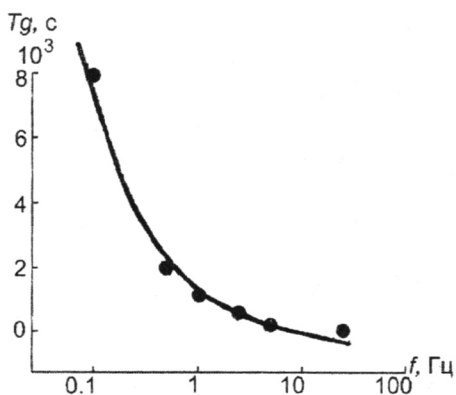


Рис.7. Зависимость среднего времени жизни  $T_g$  динамического спирального домена от частоты внешнего магнитного поля  $f$ .

Ранее считалось, что спиральные домены формируются наматыванием витков при движении внешнего конца спирали. Действительно, статические спирали «растут» именно таким образом – закрепленный на дефекте полосовой домен изгибается в форме спирали при снижении поля [13]. Динамические спиральные домены формируются при амплитудах поля, меньших поля статического насыщения образца и в

любой момент (см. рис. 4б) они окружены доменным хаосом, поэтому наматывание витков спирали движением ее внешнего конца маловероятно.

Небольшая частота поля ( $f=2,5$  Гц) позволила проследить процесс образования спирали. На рис. 5 представлена схема последовательных изменений одного и того же СДД за время его жизни. Видно, что сначала существует отросток полосового домена (рис. 5а), который постепенно поворачивается под действием гиротропной силы [17] – образуется небольшой

спиральный домен (рис. 5б).

Далее, от периода к периоду поля внутренний конец спирали продолжает поворачиваться, внешние витки увеличиваются в диаметре (рис. 5в-5е). Координаты центра СДД за время жизни  $T_g$  меняются в пределах  $60 \times 100 \text{ мкм}^2$ , что на порядок меньше размеров образца ( $S \sim 16 \text{ мм}^2$ ), т.е. спираль как целое почти не перемещается по пленке.

Известны эксперименты, свидетельствующие о влиянии гиротропной силы на формирование спиральных доменов [11], но подробно этот процесс рассмотрен впервые.

Зависимость геометрических параметров спирального домена от времени показана на рис. 6. Видно, что количество витков и размер спирального домена растут с течением времени (рис. 6а-6б). Перед разрушением СДД количество его витков уменьшается в 3 раза по сравнению с максимальным (с 6 до 2,5), а средний размер только на 20 % - т.е. резко увеличивается средний период спирали – она становится «рыхлой», образуются отростки на витках спирали (рис. 5ж-5з).

В литературе образование отростков (дисклинаций) у полосовых доменов считается свидетельством формирования в их доменных границах линий Блоха [19]. Можно предположить, как и в главе 3, что в течение жизни в доменных стенках СДД накапливаются неоднородности – точки и линии Блоха. Когда их количество превышает некоторое критическое значение - спиральный домен разрушается.

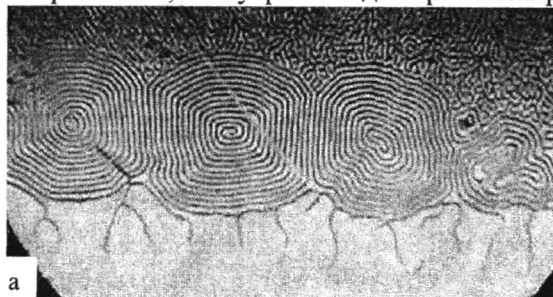
Таким образом, для формирования спирального домена необходимо наличие линий Блоха в доменных стенках, поскольку СДД образуется поворотом бокового отростка полосового домена под действием поля (рис. 5а). Разрушение спирального домена, вероятно, также происходит под действием линий Блоха (рис. 5ж-5з).

Зависимость времени жизни СДД  $T_g$  (рис. 7) от частоты поля можно объяснить тем, что, время, необходимое для формирования СДД (для набора им максимального количества витков), определяется количеством периодов поля, следовательно, с уменьшением частоты время формирования, а также время жизни спирали будет увеличиваться.

Нижняя граница существования СДД по частоте, видимо,

будет определяться временем релаксации доменной структуры [11].

При выключении переменного поля внешние витки спиральных доменов, имеющие форму многогранников, сохраняются, а внутренние два-три витка разрушаются, переходя в



└ 200 мкм

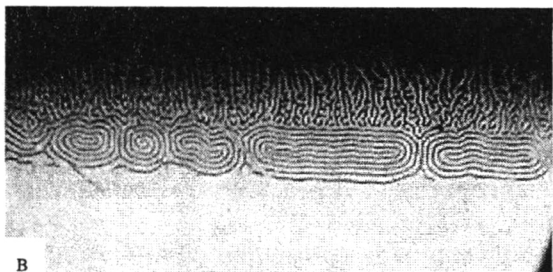
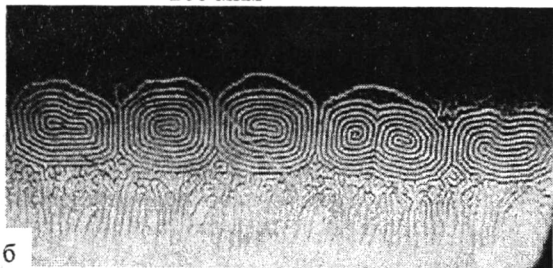


Рис. 8 Вид цепочек спиральных динамических доменов в пленке феррита-граната №1 в переменном гармоническом поле при наложении постоянного подмагничивающего поля с линейным градиентом. Величина градиента grad  $\mathbf{B}$ : а - 39; б - 69; в - 85 мТл/см.

обычную лабиринтную структуру. Этот факт говорит о том, что ядро динамического спирального домена в статическом состоянии не является равновесной структурой и может существовать только под действием внешнего магнитного поля.

В пятой главе приводятся результаты эксперимента по наблюдению динамических спиральных доменов в переменном поле в присутствии подмагничивающего поля с линейным градиентом.

Показано, что в области ангерного состояния в присутствии подмагничивающего постоянного поля с линейным

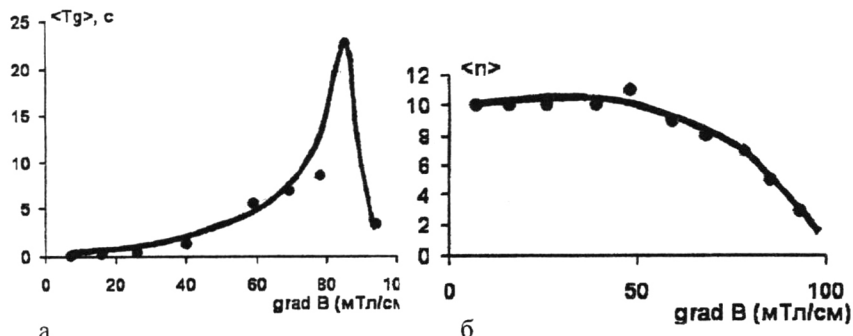


Рис. 9. Зависимость от величины постоянного поля с линейным градиентом (параметры переменного поля  $f = 2,5 \text{ кГц}$ ,  $H_0 = 25,3 \text{ Э}$ ): а - среднего времени жизни  $\langle T_g \rangle$ ; б - среднего количества витков  $\langle n \rangle$  цепочечного спирального домена.

градиентом в пленках феррита-граната формируются цепочки спиральных динамических доменов (рис. 8). Установлено, что с ростом градиента спиральные домены сжимаются вдоль линии градиента, а количество витков в них уменьшается (рис. 8б-8в).

Время жизни  $T_g$  цепочечных спиральных доменов возрастает с ростом градиента, имеет максимум, после которого резко уменьшается (рис. 9а). Максимальное  $T_g$  на порядок превышает  $T_g$  в отсутствие подмагничивающего градиентного поля.

Цепочечный спиральный домен перемещается только вдоль нулевой линии градиента, скорость его дрейфа ( $V_{d1} = 0,05 \text{ мм/с}$ ) на порядок меньше, чем известная скорость дрейфа спирального домена в отсутствие градиента в гармоническом поле ( $V_{d2} = 0,4 \text{ мм/с}$  [9]).

В градиентном магнитном поле зависимость числа витков цепочечного спирального домена от величины градиента поля монотонно убывает, начиная с некоторого значения градиента (рис. 9б).

Существенное увеличение времени жизни СДД, стабилизированного постоянным подмагничивающим полем с линейным градиентом, имеет магнитостатическую природу (взаимодействие спиралей в цепочке), а также оно обусловлено

относительной малоподвижностью цепочечного СДД. Поскольку он перемещается с меньшей скоростью, уменьшается вероятность возникновения неоднородностей внутренней структуры доменных границ (линий и точек Блоха), а значит, увеличивается время жизни спирального домена.

Завершается диссертация изложением основных полученных в работе результатов и списком цитируемой литературы.

### **Основные выводы и результаты диссертации**

- 1) Установлена подробная связь формы динамических доменных структур и петель гистерезиса пленок ферритов-гранатов в пространственно однородных гармонических магнитных полях. Зафиксировано три типа динамических доменов, сменяющих друг друга с ростом амплитуды поля: полосовые, древовидные, радиальные. Это может свидетельствовать об изменении механизмов перемагничивания.
- 2) Впервые обнаружены и выделены как отдельный тип древовидные динамические доменные структуры. Домены такого вида образуются в момент скачка намагниченности и являются наиболее оптимальными для быстрого заполнения свободной части образца доменами растущей магнитной фазы, а значит, снятия неравновесности доменной структуры.
- 3) Впервые обнаружено, что под действием магнитного поля ультранизких частот ((0,01-20) Гц) в высокоанизотропных пленках ферритов-гранатов возможна реализация ангерного состояния. В гармонических магнитных полях таких частот формируются системы кольцевых концентрических доменов, а в поле типа симметричный меандр — плотная упаковка спиральных динамических доменов.
- 4) Наблюдение упорядоченных динамических доменных структур при ультранизких частотах позволило выявить некоторые аспекты механизмов их формирования:
  - а. образование систем кольцевых концентрических доменов обусловлено достаточно высокой амплитудой поля, задержкой намагничивания, наличием в образце нескольких точечных дефектов;
  - б. образование динамического спирального домена в импульсных полях ультранизких частот происходит вращением

внутреннего свободного конца под действием гиротропной силы. Возможно, что в гармонических полях звуковых частот динамические спиральные домены развиваются аналогичным образом.

5) Впервые установлено влияние подмагничивающего поля с линейным градиентом на поведение цепочек спиральных динамических доменов. Время жизни цепочечных спиральных динамических доменов зависит от величины градиента - оно возрастает с ростом градиента и имеет максимум, после которого резко уменьшается. Максимальное время жизни на порядок превышает время жизни в отсутствие подмагничивающего градиентного поля. Предполагается, что этот факт связан с малоподвижностью и магнитостатическим взаимодействием спиральных динамических доменов в цепочке.

### **Основные результаты диссертации опубликованы в работах:**

#### **Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах, определенных ВАК:**

1. В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко. Динамические системы кольцевых концентрических магнитных доменов в высокоанизотропной пленке феррита-граната в магнитных полях инфразвуковых частот. ФТТ. Т.47. В.10. С.1806-1812 (2005).
2. Осадченко В.Х., Пашко А.Г., Кандаурова Г.С. Доменная самоорганизация в пленке феррита-граната в импульсных магнитных полях инфразвуковых частот. ФММ. Т.103. В.4 с. 383-385 (2007).
3. Г.С.Кандаурова, А.Г. Пашко, В.Х.Осадченко. Динамические доменные структуры и петли гистерезиса пленки феррита-граната с умеренной анизотропией. ФММ. Т.108. В.1. С.1-5 (2009).
4. Кандаурова Г.С., Пашко А.Г., Осадченко В.Х. Влияние параметров гармонического магнитного поля на динамические петли гистерезиса и доменную структуру пленки феррита-граната. ФТТ. Т.51. В.5. С.911-915 (2009).

#### **Другие публикации:**

1. В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко. Некоторые особенности динамического перемагничивания пленок ферритов-



гранатов. Сборник трудов IXX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 28 июня-2 июня 2004 г. Москва. С.98-100.

2. В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко, А.А.Шинкоренко. Упорядоченные динамические доменные структуры пленки феррита-граната в переменных полях инфразвуковых частот. Сборник трудов IXX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 28 июня-2 июня 2004 г. Москва. С.106-108.

3. В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко. Вихревые динамические доменные структуры. Сборник трудов IXX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 28 июня-2 июня 2004 г. Москва. С.141-142.

4. В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко. Время формирования системы динамических спиральных доменов в пленке феррита-граната. Сборник трудов XX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 12 июня-16 июня 2006 г. Москва. С.467-468.

5. В.Х. Осадченко, Г.С. Кандаурова, А.Г. Пашко. Зависимость от температуры времени жизни динамических спиральных доменов в пленке феррита-граната. Сборник трудов XX международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 12 июня-16 июня 2006 г. Москва. С.469.

6. Осадченко В.Х, Пашко А.Г.// Domain self-organization in iron-garnet films.// Сборник тезисов ESTMAG-2007 23-26 August 2007, Kazan, Russia, p.199.

7. Кандаурова Г.С., Пашко А.Г., Осадченко В.Х. Новые формы зародышей обратной магнитной фазы. с.90-91. III Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» Сентябрь 23-26, 2008 . Тезисы докладов. Иркутск, 2008.

8. Кандаурова Г.С., Пашко А.Г., Осадченко В.Х. Прямое сопоставление динамических доменных структур с конкретными точками на динамической петле магнитного гистерезиса, с.92-93. III Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» Сентябрь 23-26, 2008 . Тезисы докладов. Иркутск, 2008.

9. Пашко А.Г., Кандаурова Г.С., Осадченко В.Х. Динамическая

доменная фазовая диаграмма для пленки феррита-граната в магнитном поле типа симметричный меандр, с.96-97. III Байкальская международная конференция «Магнитные материалы. Новые технологии» Сентябрь 23-26, 2008 . Тезисы докладов. Иркутск, 2008.

### **Список цитируемой литературы:**

1. М.Ю.Гусев, Р.М.Гречишкин, Ю.Ф.Козлов, Н.С.Неустроев. Магнитооптическая визуализация магнитного поля с помощью монокристаллических пленок ферритов-гранатов. Изв.вузов. Материалы электронной техники. №1, с.27-37. 2002.
2. Г.С.Кандаурова, А.Э.Свидерский. Возбужденное состояние и спиральная динамическая структура в магнитном кристалле. Письма в ЖЭТФ. Т.47, в.8, с.210-412, 1988.
3. Г.С.Кандаурова, А.Э.Свидерский. Процессы самоорганизации в многодоменных магнитных средах и формирование устойчивых динамических структур. ЖЭТФ., Т.97, в.4, с.1218-1229, 1990.
4. Г.С.Кандаурова, В.Х.Осадченко. Эффект «мигающей» петли гистерезиса в ангерном состоянии пленок ферритов-гранатов. Письма в ЖЭТФ. Т.20, в.21, с.24-27, 1994.
5. М.В.Логунов, М.В.Герасимов. Эволюция динамических спиральных доменов в течение периода переменного магнитного поля. ФТТ. Т.44, в.9, с.1627-1637, 2002.
6. Г.С.Кандаурова, В.Х.Осадченко. Устойчивые и неустойчивые гистерезисные циклы в пленках ферритов-гранатов. ДАН. Т.365, №2, с.181-183, 1999.
7. М.В.Логунов, М.В.Герасимов. Формирование и эволюция гигантских динамических доменов в гармоническом магнитном поле. ФТТ. Т.45, в.6, с.1031-1036, 2003.
8. В.Логунов, М.В.Герасимов, П.М.Малышева. Сборник трудов XVIII международной школы-семинара «Новые магнитные материалы микроэлектроники» 24-28 июня 2002 г., Москва, с.428.
9. Г.С.Кандаурова, В.Х.Осадченко. Свойства и эволюция динамических спиральных доменов в ангерном состоянии высокоанизотропной пленки феррита-граната. ФММ. Т.97, №2, с.38-54, 2004.
10. Г.С.Кандаурова. Новые явления в низкочастотной динамике коллектива магнитных доменов. УФН. Т.172, №10, с.1165-1187, 2002.

11. Ф.В.Лисовский, Е.Г.Мансветова. Спиральные домены в магнитных пленках. ФТТ. Т.31, в.5, с.273-275, 1989.
12. К.В.Ламонова, Ю.А.Мамалуй. Теоретическое описание спиральной доменной структуры тонких одноосных феррит-гранатовых пленок. ФТВД. Т.7, №2, с.82-93, 1997.
13. А.П.Гесь, В.В.Федотова, А.К.Богущ, Т.А.Горбачевская. Спиральные домены в монокристаллических пленках ферритов-гранатов в статических магнитных полях. Письма в ЖЭТФ. Т.52, в.9, с.1079-1081, 1990.
14. А.Ф.Гальцев, Ю.М.Ялышев. Численное моделирование динамически устойчивых состояний системы кольцевых доменов. ФММ. Т.89, в.3, с. 24-30, 2000.
15. В.Н.Мальцев, Г.С.Кандаурова, Л.Н.Картагулов. Динамическая устойчивость спирального домена в переменном магнитном поле. ФТТ. Т. 45, в.4, с.658, 2003.
16. В.В.Боков, В.А.Волков. Динамика доменной стенки в ферромагнетиках (Обзор). ФТТ. Т.50, в.2, с.193-221, 2008.
17. А.Малоземов, Дж.Слонзуски. Доменные стенки в материалах с цилиндрическими магнитными доменами. М.:Мир, 1982. 382с.
18. И.Е. Дикштейн, Ф.В.Лисовский, Е.Г.Мансветова, Е.С. Чижик. Формирование рефлексивных доменных структур при монополярном и циклическом намагничивании одноосных магнитных пленок. ЖЭТФ. Т.100, в.5, с. 1606-11626, 1991.

10-

Подписано в печать 5 ноября 2009 года. Формат 60х84 1/16  
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 1,5. Тираж 100 экз. Заказ № 163  
Отпечатано в ИПЦ «Издательство УрГУ»  
г. Екатеринбург, ул. Тургенева, 4.